

УДК 539.422.5

**А.В. Белый** (A.V. Belyj)  
(ФТИ НАН Беларуси, г. Минск, РБ),

**В.Н. Гаранин, А.А. Гришкевич**  
(V.N. Garanin, A.A. Grishkevich)  
(БГТУ, г. Минск, РБ)

E-mail для связи с авторами: garanin@wmt.by

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИОННО-ЛУЧЕВОГО АЗОТИРОВАНИЯ  
СТАЛЬНОГО ДЕРЕВОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА  
НА ПЕРИОД ЕГО СТОЙКОСТИ**

**THE RESEACH ION-BEAM NITRIDING EFFECT OF WOODWORKING TOOLS,  
MADE OF HIGH SPEED STEEL, FOR THE PERIOD OF ITS RESISTANCE**

*Несмотря на относительно высокую себестоимость, ионно-лучевая обработка позволяет в ряде случаев обеспечивать недостижимый другими методами комплекс физико-механических свойств. Особенно эффективна обработка гетерогенных материалов, в которых границы раздела фаз с сильно различающимися механическими свойствами являются концентраторами напряжений и потенциальными областями возникновения повреждений. Правильный выбор параметров обработки обеспечивает увеличение стойкости инструмента в 2,5 раза.*

*Despite the relatively high cost, ion-beam processing allows in some cases to provide the unattainable other other methods the complex of physical-mechanical properties. Particularly effective treatment-development of heterogeneous materials in which the phase boundary with a highly distinguish-corresponding mechanical properties are stress concentrators and potential areas to cause damage. The correct choice of processing option provides increased rack STI up to 2.5 times.*

К перспективным методам повышения износостойкости инструмента (в том числе и дереворежущего) относится ионно-лучевая обработка при высоких плотностях тока, в частности, обработка с использованием примесей внедрения, обеспечивающая, большую глубину модифицированного слоя и эффективное упрочнение поверхности [1]. Несмотря на относительно высокую себестоимость, ионно-лучевая обработка позволяет в ряде случаев обеспечивать недостижимый другими методами комплекс физико-механических свойств.

Особенно эффективна обработка гетерогенных материалов, в которых границы раздела фаз с сильно различающимися механическими свойствами являются концентраторами напряжений и потенциальными областями возникновения повреждений. В частности, установлено, что образование на межфазных границах наноразмерных упрочняющих включений приводит к эффективному расширению интерфейсных областей с соответствующим снижением градиентов локальных напряжений и реализацией механизма дисперсного упрочнения границ [2]. Это особенно актуально, учитывая динамические и триботехнические условия взаимодействия дереворежущего инструмента с обрабатываемым материалом.

Проведенные ранее исследования стали Р6М5 [3, 4] показали, что наиболее эффективное повышение триботехнических характеристик наблюдается после ионно-лучевого азотирования при следующих условиях: температура – 770 К, энергии бомбардирующих ионов – 2–3 кэВ, плотность ионного тока – 2 мА/см<sup>2</sup>, интегральный

флюенс ионов –  $3 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$ . Толщина модифицированного слоя при этом составляет свыше 40 мкм, а микротвердость поверхности достигает 12 000 МПа. В поверхностном слое наблюдается формирование ряда нитридов и карбонитридов, а также аморфных областей, образующихся по механизму твердофазной аморфизации [5, 6]. Обработка при более низких температурах приводит к формированию модифицированного слоя, толщина которого слишком мала для обеспечения высокой несущей способности поверхности. Микротвердость поверхности также оказывается ниже (10 500 МПа) При более высоких температурах происходит увеличение концентрации и укрупнение высокопрочных включений в поверхностном слое стали, вызывающее его охрупчивание и ухудшение триботехнических характеристик.

В качестве материалов для исследования использовались импортные ножи типа HSS, которые широко используются на деревообрабатывающих предприятиях Республики Беларусь. Изучение их химического анализа показало, что ножи являются аналогом быстрорежущей стали типа P18. Данные химического анализа исследуемой стали приведены в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав исследуемой стали

Химический элемент	Концентрация, %
Железо	78,6
Вольфрам	16,7
Хром	3,7
Ванадий	1,0

Сталь P18 относится к быстрорежущим сталям вольфрамового класса, уникальные свойства которых (высокая теплостойкость, красностойкость при наличии высокой твердости и износостойкости) достигаются посредством специального легирования и сложной термической обработки, обеспечивающих определенный фазовый состав.

Выбранная сталь широко применяется при изготовлении ножей и инструмента для строгания, долбления, точения, изготовления сверл, разверток, метчиков, в том числе инструмента для деревообработки. Для сталей с высокой концентрацией вольфрама характерна повышенная карбидная неоднородность, способствующая выкрашиванию инструмента. Исследуемые ножи имели размер  $100 \times 30 \times 3 \text{ мм}$ , из которых были вырезаны и подготовлены к исследованиям образцы, представленные на рисунке 1.

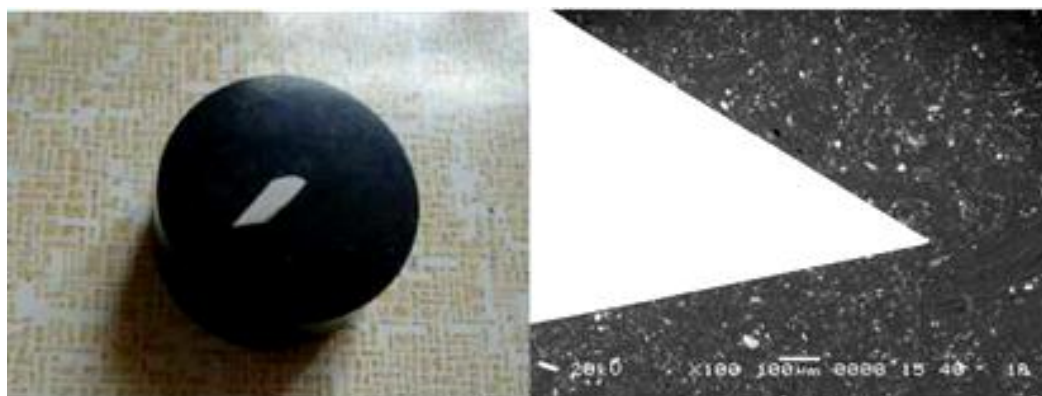


Рис. 1. Фотография поперечного сечения ножа ( $\times 100$ )

Химический анализ стали проводился с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра S4 PIONEER.

Металлографический анализ выполнялся с использованием микроскопа ЕС МЕТАМ РВ-21, оснащенного приставкой для анализа изображений и программного комплекса обработки изображений.

Триботехнические испытания проводились на машине трения СМЦ-2 по схеме «диск – частичный вкладыш из изучаемой стали в среде смазочно-охлаждающей жидкости». Величина износа определялась по потере массы вкладыша. Диаметр диска равнялся 35 мм, максимальная нагрузка – 1000 Н, частота вращения диска – 300 мин<sup>-1</sup>.

Для ионно-лучевой обработки использовалась модернизированная установка УВН-2М (рис. 2), оснащенная ионным источником типа ускорителя с анодным слоем и замкнутым дрейфом электронов.



Рис. 2. Установка ионно-лучевого модифицирования

Источник генерировал поток ионов азота длиной 120 и шириной 25 мм. При обработке использовалась система механического сканирования модифицируемых поверхностей, обеспечивающая равномерное облучение. Имплантация проводилась при энергиях ионов азота 2 кэВ и плотности ионного тока 2 мА/см<sup>2</sup>. Температура образцов в процессе ионно-лучевой обработки в диапазоне – 770 К, а время обработки – 1,5 часа. Контроль температуры осуществлялся с помощью хромель-алюмелевой термопары.

Анализ структурно-фазовых изменений осуществлялся с использованием рентгеновского дифрактометра ДРОН 3 по методике, описанной в [3].

Примеры микроструктуры для образцов в состоянии поставки и после ионно-лучевой обработки представлены на рисунке 3.

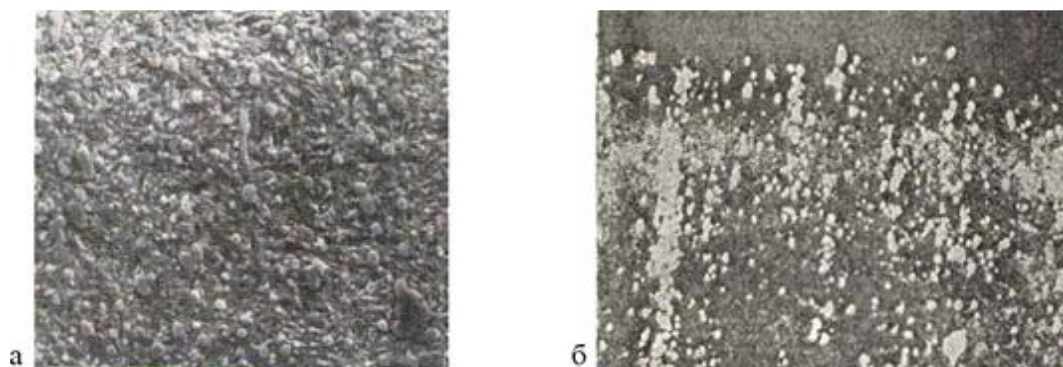


Рис. 3. Микроструктура стали:  
а – до ионно-лучевой обработки; б – после ионно-лучевой обработки

Ионно-лучевая обработка стали при высокой плотности ионного тока и температуре 770 К приводит к формированию модифицированного поверхностного слоя толщиной 40–50 мкм. Верхняя часть этого слоя образована слабо травящимся слоем, под которым находится слой с повышенной травимостью.

Основным карбидом в исследуемой стали является  $(\text{Fe}, \text{M})_6\text{C}$ , обладающий сложной ГЦК кристаллической решеткой с пространственной группой  $\text{Fd}\bar{3}\text{m}$ .

Насыщение матричных фаз стали атомами азота приводит к выделению большого количества нитридных ( $\gamma'$ , и  $\epsilon$ ) и дисперсных карбонитридных  $\text{M}_6(\text{C}, \text{N})$  и  $\text{M}(\text{C}, \text{N})$  фаз, изоморфных соответствующим карбидным фазам.

В таблице 2 приведены результаты триботехнических испытаний. Приведенные данные показывают, что ионно-лучевое азотирование обеспечивает повышение износостойкости стали примерно в 2,5 раза.

Таблица 2

Коэффициент трения и скорость изнашивания стали Р18 в функции времени

Обработка поверхности	Время испытаний, мин	Коэффициент трения	Скорость изнашивания стали мкм/мин
Инструмент без упрочнения	0	1,4	–
	20	1,1	0,4
	40	0,4	1,1
Ионно-лучевая обработка	0	1,2	–
	20	0,7	0,2
	40	0,3	0,4

Сопоставление данных по структуре поверхностного слоя и изменении радиуса резания показывает, что за использованный период испытания модифицированный слой был изношен не более чем на половину своей толщины.

Изменение коэффициента трения, особенно значительное на ранних стадиях фрикционного взаимодействия, обусловлено снижением адгезионного взаимодействия при образовании на поверхности упоминавшегося нетравящегося слоя, также уменьшением площади фактического контакта за счет упрочнения поверхностного слоя.

Для испытания инструмента на стойкость при обработке древесного материала использовалась установка, созданная на базе станка Unimat 23EL, а для контроля изменения радиуса инструмента – установка OptiControl. Оборудование представлено на рисунке 4.



Рис. 4. Используемые установки:  
а – Unimat 23EL; б – OptiControl

Испытания проводились при следующих параметрах обработки: скорость подачи  $V_s = 6$  м/мин; припуск на обработку  $h = 2$  мм; частота вращения инструмента  $n = 6000$  мин<sup>-1</sup>; число работающих ножей  $z = 1$ ; диаметр резания  $D = 128$  мм; угол резания  $\delta = 65$  град; угол заострения ножа  $\beta = 40$  град.

Результаты испытаний инструмента на стойкость при обработке древесного материала МДФ представлены на рисунке 5.

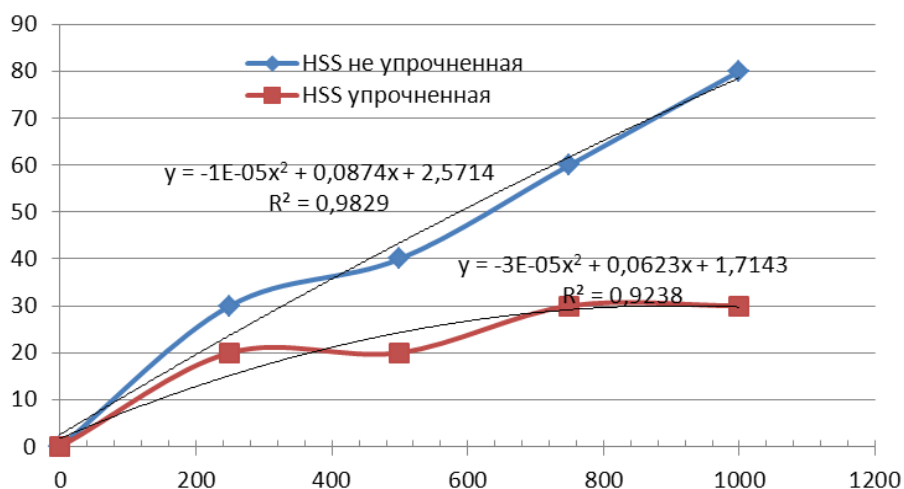


Рис. 5. Зависимости радиуса резания  $R$  инструмента от пути взаимодействия инструмента с материалом  $L$

Таким образом, представленные данные показывают, что уменьшение радиуса резания при использовании упрочненной стали происходит в 2,5 раза медленнее, чем при использовании той же стали без упрочнения, что указывает на работоспособность упрочненных слоев исследуемой стали P18. Данный результат похож с данными, полученными при проведении триботехнических испытаний (табл. 2).

Повышение износостойкости можно объяснить упрочняющим действием образующихся при ионно-лучевой обработке нитридов и карбонитридов, равно как генерацией остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое стали P18 при насыщении ее примесями внедрения. Ранее было показано, что удельный размер образующихся при имплантации частиц превышает удельный объем матричной фазы легируемого материала. Следует также отметить, что наблюдавшаяся в поверхностных слоях ионно-азотированных сталей  $\gamma'$ -фаза обладает наилучшими триботехническими характеристиками в сравнении с другими нитридами (в частности с нитридами, богатыми азотом) [7].



Выполнен анализ структурных изменений и триботехнических свойств поверхностных слоев дереворежущего инструмента (из быстрорежущей стали типа P18), подвергнутого ионно-лучевому азотированию. Для исследования использовались ножи для обработки древесины, выполненные из быстрорежущей стали типа P18. Выбор был обоснован тем, что сталь P18 относится к быстрорежущим сталям вольфрамового класса, уникальные свойства которых (высокая теплостойкость, красностойкость при наличии высокой твердости и износостойкости) достигаются посредством специального легирования и сложной термической обработки, обеспечивающих определенный фазовый состав. Представленные данные показывают, что уменьшение радиуса резания при использовании упрочненной стали происходит в 2,5 раза медленнее, чем при использовании той же стали без упрочнения.

### Библиографический список

1. Белый, А.В. Ионно-лучевое азотирование металлов, сплавов и керамических материалов / А.В. Белый. – Минск, 2014. – 411 с.
2. Овчаренко, В.Е. Современные методы и технологии создания и обработки материалов / В.Е. Овчаренко, Ю.Ф. Иванов, А.В. Белый [и др.] // Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2014. – С. 238–247.
3. Физика металлов и металловедение / А.В. Белый, В.А. Кукареко, О.В. Лободаева, С.К. Ших, 1995. – С. 80, 82–95.
4. Byeli, A.V. NIMB Beam Interactions with Materials & Atoms / A.V. Byeli, O.V. Lobodaeva, S.K. Shykh. – В 103, 1995, Pp. 533–536.
5. Pampus, K. Europhysics Letters / K. Pampus, K. Samwer, J. Bottiger. – 1987. – Vol. 5. – Pp. 581.
6. Schwarz, R.B. Phys. Letters / R.B. Schwarz, W.L. Johnson. – 1983. – Vol. 51. – Pp. 415.
7. Wei, R. Tribological studies of ion implanted steel constituents / R. Wei, Ph.D. – Thesis, Colorado State University, Fort Collins, 1990.

УДК 674.05

**М.В. Газеев, В.И. Сулинов**

(M.V. Gazeev, V.I. Sulinov)

(УГЛТУ, г. Екатеринбург, РФ)

E-mail для связи с авторами: gazeev\_m@list.ru

### ОПЫТ РАСЧЕТА АСПИРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МЕБЕЛЬНОГО ЦЕХА

#### THE FURNITURE SHOP OF EXPERIENCE CALCULATION OF ASPIRATION SYSTEM

*На современных деревообрабатывающих предприятиях для перемещения измельченных отходов деревообработки применяют пневматический транспорт, который является многофункциональным и обеспечивает санитарно-гигиенические условия, защищая окружающий воздух. Авторами был проведен детальный анализ действующей системы аспирации цеха мебельной фабрики «Купе» и выполнен расчет централизованной системы аспирации.*